

程善俊,管晓丹,黄建平,等. 利用 GLDAS 资料分析黄土高原半干旱区土壤湿度对气候变化的响应[J]. 干旱气象,2013,31(4):641-649, doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-04-0641

利用 GLDAS 资料分析黄土高原半干旱区 土壤湿度对气候变化的响应

程善俊,管晓丹,黄建平,季明霞

(半干旱气候变化教育部重点实验室,兰州大学大气科学学院,甘肃 兰州 730000)

摘要:利用 GLDAS 资料分析了 1948 ~ 2010 年黄土高原半干旱区气温、降水和土壤湿度的变化趋势,并重点讨论了气温和降水对土壤湿度的影响和相对贡献。结果表明:近 60 a 来黄土高原半干旱区整体呈现暖干化趋势,增温速率明显高于全球平均增温速率;不同深度的土壤湿度的长期变化均呈减小趋势,且年际间变化明显。不同深度的土壤湿度和气温呈负相关关系,并随着土壤加深,两者的相关性加强;土壤湿度和降水则呈正相关关系,相关关系最大出现在表层土壤。通过分析气温和降水在不同季节对土壤湿度的相对贡献发现,春季和冬季气温对土壤湿度的相对贡献较降水显著,秋季恰好相反,夏季气温和降水对土壤湿度的相对贡献大小相当。对比不同深度层降水、气温对土壤湿度的相对贡献得出,降水对浅层土壤湿度有显著作用,而气温对深层土壤湿度的作用更明显。

关键词:黄土高原;半干旱区;土壤湿度;气温;降水

文章编号:1006-7639(2013)-04-0641-09 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-04-0641

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

引言

随着全球增暖的日益明显和区域干旱化现象^[1]发生频率的增加,不同气候区对全球气候变化响应的差异性受到越来越广泛的关注。半干旱地区作为陆地的重要组成部分,具有下垫面复杂多样、地表植被稀疏和对气候变化的响应敏感等特点,是受全球气候变化影响最显著的地区之一,半干旱气候的研究一直都是区域气候变化研究的重点和前沿。Huang 等^[2]通过分析近百年的气温和降水资料发现,北半球中高纬度半干旱区增温显著,这种显著的半干旱增温(ESAW)可能加剧该地区干旱化的发生。研究表明,作为干旱半干旱地区的重要部分,中国北方出现了明显的暖干化现象,该现象的发生已经成为全球变暖背景下我国面临的主要气候环境问题之一^[3]。黄土高原半干旱区是我国北方显著暖干化地区之一,该地区气候变化敏感,生态环境脆弱,气候变暖与区域干旱化使得该地区降水和气温

等气象要素具有独特的变化特征^[4-5];土壤湿度的减小^[6-9],生态环境改变^[10-12],农作物减产^[13-14],沙尘和干旱灾害频发,严重制约着当地经济发展和人类生活质量的提高,对已经脆弱的生态和农业生产构成严重威胁。由于黄土高原在气候变化研究中的重要地位,黄土高原干旱化是我国干旱半干旱气候研究中的重要组成部分。

干湿变化指数是目前研究干旱化的主要方法之一^[15-18]。此外,土壤湿度也是衡量气候干湿变化的一个重要变量,其积累了地表水文过程的大量信息,不仅对降水变化有直接响应,也受温度变化的控制。同时,土壤湿度的时空变化与生态系统的关系密切,可以作为研究我国北方干旱化问题的一个客观定量的综合指标^[19]。土壤湿度通过改变地表反照率及土壤热容量和向大气输送感热、潜热等影响气候,并受到气候变化的影响。一般来讲,土壤湿度大的地区地表反照率较小,土壤热容量和导热系数较大,而这种关系在不同的地区又有不同的表现形

收稿日期:2013-04-28;改回日期:2013-10-22

基金项目:国家自然科学基金青年基金(40305119)、国家重大科学研究计划项目(2012CB955301)、兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2013-107、lzujbky-2013-109和lzujbky-2013-ct05)共同资助

作者简介:程善俊(1990-),男,山东省蒙阴人,硕士研究生,主要从事陆面过程和土壤湿度变化研究。E-mail:chengshj08@lzu.edu.cn

通讯作者:管晓丹(1983-),女,吉林省通化人,博士,讲师,主要从事气候变化和陆面过程研究。E-mail:guanxd@lzu.edu.cn

式^[20-21],土壤湿度对后期气候也会产生不同的影响和作用^[22]。对于同一地区来说,土壤湿度变化主要受到当地土壤特性、太阳辐射、空气相对湿度、风速等多因素共同影响,其中以气温和降水量的影响最显著。

鉴于土壤湿度在气候变化中的重要作用,对它的研究一直都是气候研究的重点之一^[23-26]。但受观测资料时间长度和空间范围的限制,区域尺度和年际尺度上土壤湿度在气候变化过程中的作用研究仍相对匮乏。遥感观测^[12,27]虽然具有全球覆盖的空间优势,但其对反演算法有很大的依赖性,无法反演较深层的土壤湿度,限制土壤湿度的遥感观测研究。数值模式的发展和应用^[28],使长时间和大范围土壤湿度气候特征的研究成为可能,但模式的模拟结果很大程度上依赖初始场的准确性。GLDAS (Global Land Data Assimilation System)就是为了克服以上困难而建立起来的一个全球高分辨率的陆面同化系统,相比其他模拟产品,GLDAS 驱动数据更准确^[29],模拟结果更合理。目前,GLDAS 以其独有的优势,支持了大量的研究工作^[30-33]。因此,本文采用 GLDAS 作为研究数据,分析黄土高原半干旱地区 60 多 a 来气温、降水和土壤湿度的变化特征,并重点讨论了气温和降水对土壤湿度的影响特点和相对贡献,从长时间序列上加深我们对黄土高原半干旱地区土壤湿度与气温、降水之间相关机制的理解,为采取有效手段抑制土壤水分恶化,改善水土状况,合理利用气候资源,调整农业生态布局,积极应对气候变化提供科学参考。

1 研究区域与资料方法

本文研究区域位于黄土高原东部(36.5° ~ 39.5°N, 108.5° ~ 111.5°E),如图 1 所示。研究区域包括陕西省北部,山西省西北部和内蒙古的部分地区。该地区地处我国东部季风湿润区与内陆干旱区的过渡地带,年平均气温 6 ~ 10 °C,年降水量在 200 ~ 600 mm 之间,由东南向西北递减,降水主要集中在 7 ~ 9 月,且多暴雨,是我国主要的雨养农业区,农牧林业生产和生态环境对气候条件的依赖性,区域干湿变化对农业生产和生态的影响显著。然而,该区域测站稀少,气象资料缺失严重,制约了区域性气候变化的研究。

本文研究使用的 GLDAS 数据是美国航空航天局(NASA)戈达德空间飞行中心(GSFC)和美国海洋和大气局(NOAA)国家环境预报中心(NCEP)联合发布的基于卫星、陆面模式和地面观测数据同

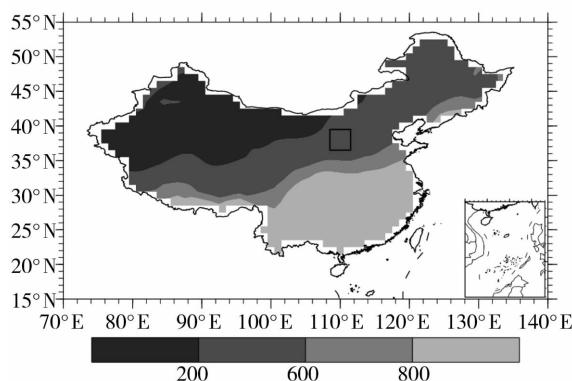


图 1 1961 ~ 1990 年中国地区年平均降水量的空间分布(方框区域为研究区)

Fig. 1 Spatial distribution of annual mean precipitation in China from 1961 to 1990
(The square region is the study area)

化产品,它能够多种驱动数据,这些数据来源于大气同化产品、再分析资料 and 实际观测^[29]。目前,GLDAS 结合 Mosaic, Noah, CLM (the Community Land Model), VIC (the Variable Infiltration Capacity) 4 个陆面模式提供了大量的陆面数据。这些高质量的全球陆面数据,被广泛应用于天气和气候预报、水循环研究和水资源应用等方面的研究。因此,本文使用 GLDAS 中与 Noah 模式结合的数据集,该数据集包括降水、气温和土壤湿度等变量,相比其他数据集,具有驱动场稳定、模式先进、时间序列长等优势。数据的空间分辨率为 1.0° × 1.0°,时间分辨率是 1948 ~ 2010 年的月资料。其中,降水量由降雨率和降雪率所求得,土壤湿度用平均层土壤含水量(研究层内单位面积的含水量 kg/m²)表示,包括 4 层,分别为 0 ~ 10 cm、10 ~ 40 cm、40 ~ 100 cm 和 100 ~ 200 cm,为了不同层土壤湿度的研究具有比较性,分别以 1/3、1/6、1/10 作为订正因子,消除了 4 层土壤厚度不同造成的影响。

本研究采用的主要分析方法包括线性回归分析、相关分析和相对贡献率的计算。其中,计算相对贡献率^[34]的方法如下: $R_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [T_{ij}^2 / (\sum_{j=1}^a T_{ij}^2)]$, T_{ij} = $b_j x_{ij}$ 为回归方程中的各项, m 为资料序列的长度, a 为回归方程中自变量的个数。

2 结果分析

2.1 黄土高原半干旱区气候的变化特点

2.1.1 气温和降水的变化特点

根据 Huang 等^[2]的研究发现,半干旱区对全球

近百年来的增温贡献率达 44.46%,说明半干旱地区在气候变化过程中发挥着重要作用。黄土高原半干旱区作为全球地表植被覆盖类型最复杂和最脆弱的地区之一,近年来表现出非常明显的增温趋势。如图 2 所示,1948~2010 年黄土高原半干旱区整体呈现变暖趋势,年平均气温倾向率为 $0.227\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,通过了 99% 的显著性检验,远高于近百年全球平均 $0.104\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的增温速率^[2],并且冬季增温最为显著(气候倾向率为 $0.357\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$),这与 Huang 等人的研究结果相类似。近 60 a 大体可以分成 2 个特征阶段:1948~1980 年,基本处于偏冷气候期(负距平),气候倾向率为 $-0.061\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;之后进入偏暖气候期(正距平),气温持续升高,气候倾向率为 $0.459\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。其中 1998 年和 2007 年平均气温分别为 $9.81\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $9.93\text{ }^{\circ}\text{C}$,为近 60 a 以来最暖的 2 个年份。

降水表现出了和气温不同的变化特征。60 多 a 来黄土高原半干旱区降水量呈现微弱的减小,变化趋势不明显,且年际波动较大。其中最大年降水量出现在 1964 年,降水量为 663.7 mm,最小是 1965 年,降水量 206.1 mm。此外,各季降水量也未表现出明显的变化趋势,四季累计降水量的倾向率分别为 $-1.506\text{ mm}/10\text{ a}$ 、 $-3.379\text{ mm}/10\text{ a}$ 、 $-2.445\text{ mm}/10\text{ a}$ 、 $-0.266\text{ mm}/10\text{ a}$,但是均没有通过 90% 显著性检验,气候变化趋势不明显。

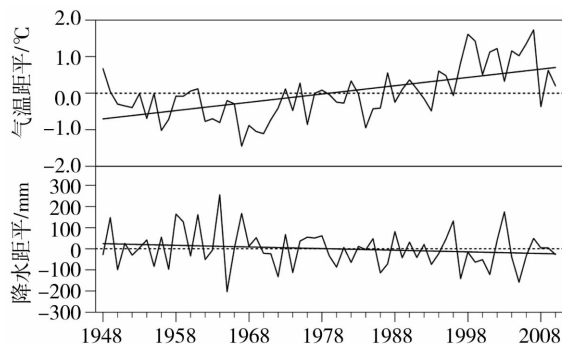


图 2 1948~2010 年黄土高原半干旱区年平均气温和降水量距平的变化

Fig. 2 The time series of annual mean air temperature and precipitation anomaly over the semi-arid area in Loess Plateau from 1948 to 2010

以上结果表明,黄土高原半干旱区存在气温增加显著和降水微弱减小的特点,为更深入研究黄土高原半干旱地区气候变化,进一步分析了该地区土壤湿度的变化特点。土壤湿度作为衡量区域干旱化程度的重要参数之一,其变化受到诸多环境因子的

影响,呈现出非常复杂的变化特征。降水、气温、光照强度和蒸发量等气候因子的季节性变化,植物的季节性生长,都会引起土壤湿度的相应变化。气候的长期演变也会造成土壤湿度的年际间差异。

2.1.2 土壤湿度的季节变化

黄土高原半干旱地区不同深度土壤湿度的季节变化存在明显差异(图 3)。其中,0~10 cm 层土壤湿度有明显的季节性变化,与降水的季节性变化具有较好的一致性,均为单峰型。6 月之前表层土壤含水量较低,随着降水量增加,土壤含水量逐步增加,在 8、9 月达到最大值,接着降水量减少,土壤水分也随之减少并在一段时期内相对稳定在一个较低的水平。10~40 cm 层土壤湿度季节变化不明显,受降水等当地气候的季节性变化影响相对较弱,变化趋势与表层也有一定的差异,在 6、7 月份土壤处于相对干旱阶段;随着夏季雨季的来临及降水量的增加,土壤湿度逐渐增大,至 9 月份达到最大值,和降水量的最大值有 1 个月左右的滞后性。40~100 cm 层和 100~200 cm 层土壤湿度的变化和 10~40 cm 层基本类似,只是季节变化更不明显,与降水量的滞后性更大。

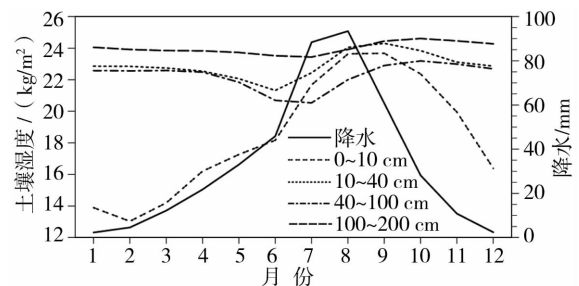


图 3 黄土高原半干旱区不同深度土壤湿度的季节演变

Fig. 3 Seasonal variations of soil moisture over the semi-arid area in Loess Plateau in different soil layers

基于以上分析结果,黄土高原半干旱区的表层土壤湿度季节性变化受该地区降水的影响较大,与降水的时间变化具有一致性,较深层的土壤湿度对降水变化的响应具有一定的滞后性。说明深层土壤能够存贮大量的前期气候信息,受降水等高频气候信号影响较小,具有记忆气候变化过程,反映区域气候变化特点的能力。

2.1.3 土壤湿度的长期变化

图 4 是 0~10 cm、10~40 cm、40~100 cm、100~200 cm 层土壤湿度的时间变化曲线。1948~2010 年黄土高原半干旱地区 4 层土壤湿度的变化

存在较好的一致性,均呈减小趋势,且年际间变化明显。20 世纪 60 年代之前,黄土高原半干旱区发生土壤变湿现象,1964 年左右达到最大值,之后土壤湿度明显下降,土壤逐步由湿润状态向干旱化态势发展。

为进一步分析土壤湿度的变化规律,分别计算不同深度各季节变化率(表 1)。从表 1 看出,0~10 cm 层土壤湿度长期变化的季节差异最明显,春季和秋季的递减率较大,夏季和冬季较小;而其他 3 层土壤湿度长期变化的季节差异不明显。

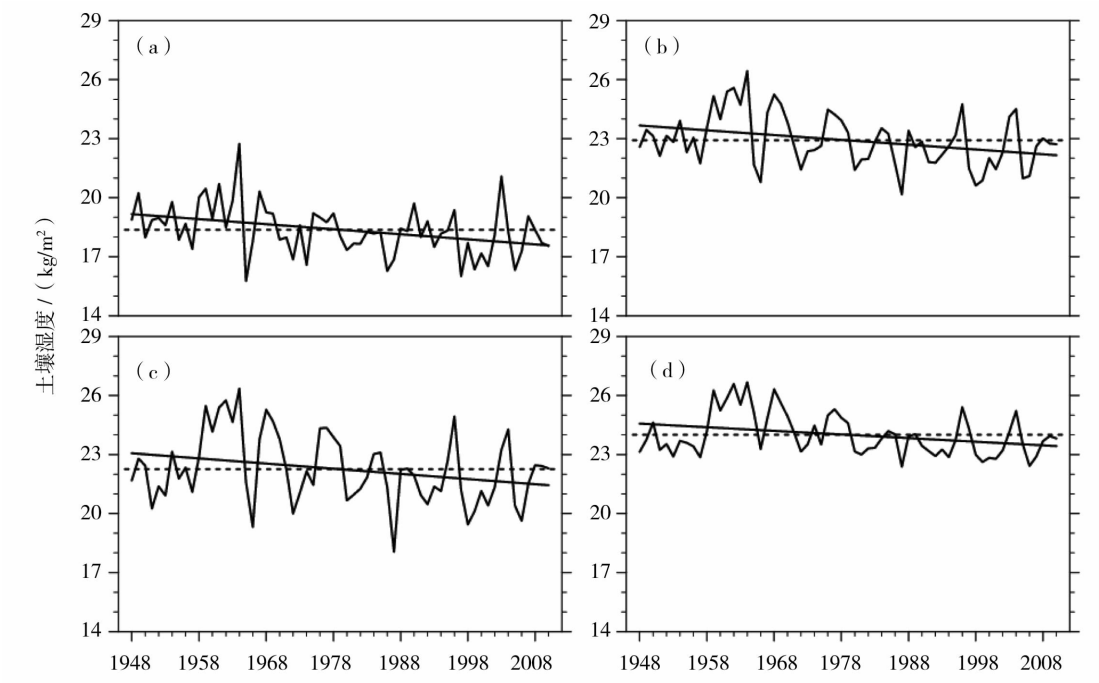


图 4 1948~2010 年黄土高原半干旱区年平均土壤湿度的时间变化
(a)0~10 cm,(b)10~40 cm,(c)40~100 cm,(d)100~200 cm

Fig. 4 The time series of annual mean soil moisture over the semi-arid area in Loess Plateau from 1948 to 2010

表 1 4 层土壤湿度变化的气候倾向率(单位:kg/m²/10 a)

Tab. 1 Climatic tendency rates of seasonal soil moisture variations in the four layers (Unit:kg/m²/10 a)

	春季	夏季	秋季	冬季	全年
0~10 cm	-0.333 *	-0.179	-0.306	-0.179	-0.256 **
10~40 cm	-0.266 *	-0.203	-0.226	-0.278 *	-0.243 **
40~100 cm	-0.264	-0.281 *	-0.261	-0.24	-0.262 *
100~200 cm	-0.169 *	-0.163 *	-0.226 *	-0.172	-0.184 *

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

2.2 降水、气温与土壤湿度的相关关系

土壤湿度变化受土壤特性、气象因子(降水、蒸散、气温和太阳辐射等)、地形(坡向、坡度和坡位等)、植被(盖度、植物种类等)、土地利用方式等因素的影响。各种影响因素对土壤湿度变化的影响程度随研究地点和季节的变化而存在差异。在黄土高原半干旱区,气温和降水是影响该地区土壤湿度变

化的最为重要的 2 个气象要素,其中,自然降水是土壤水分最主要的来源,而气温对土壤水分消耗的主要方式——蒸散有着非常重要的影响。对 1948~2010 年研究区逐年平均土壤湿度和降水量、气温进行对比分析,由其时间演变曲线(图 2 和图 4)可以看出,不同层土壤湿度与降水量均呈下降趋势,二者振荡趋势基本一致,说明土壤湿度对降水量具有一

定的依赖关系;气温的变化趋势则与土壤湿度相反,在 1967、1976、1984 气温极小年(1987、1998、2007 气温极大年),4 层土壤湿度都表现出了对应的极大(小)。初步认为 63 a 来土壤湿度显著减小与暖干

化有明显的关系。为了验证这一判断,分别做了 63 a 4 层土壤湿度距平与降水距平和气温距平的散点图(图 5,图 6),并利用相关分析研究土壤湿度与气温和降水量的关系。

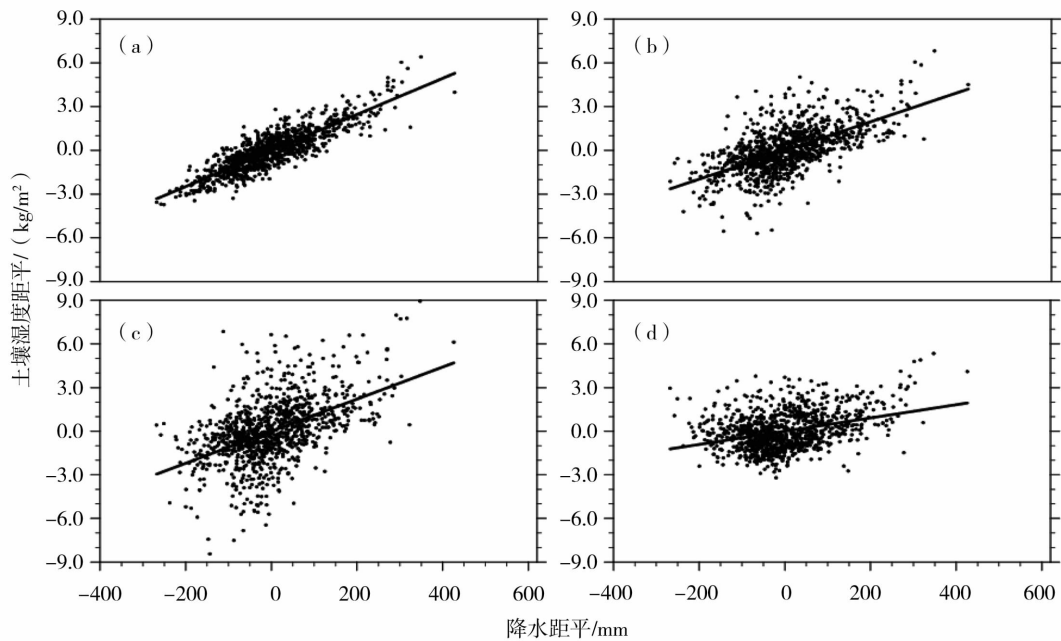


图 5 1948~2010 年黄土高原半干旱区年降水距平与土壤湿度距平的关系

(a) 0~10 cm, (b) 10~40 cm, (c) 40~100 cm, (d) 100~200 cm

Fig. 5 The relationship between annual precipitation anomaly and soil moisture anomaly over the semi-arid area in Loess Plateau from 1948 to 2010 in different layers

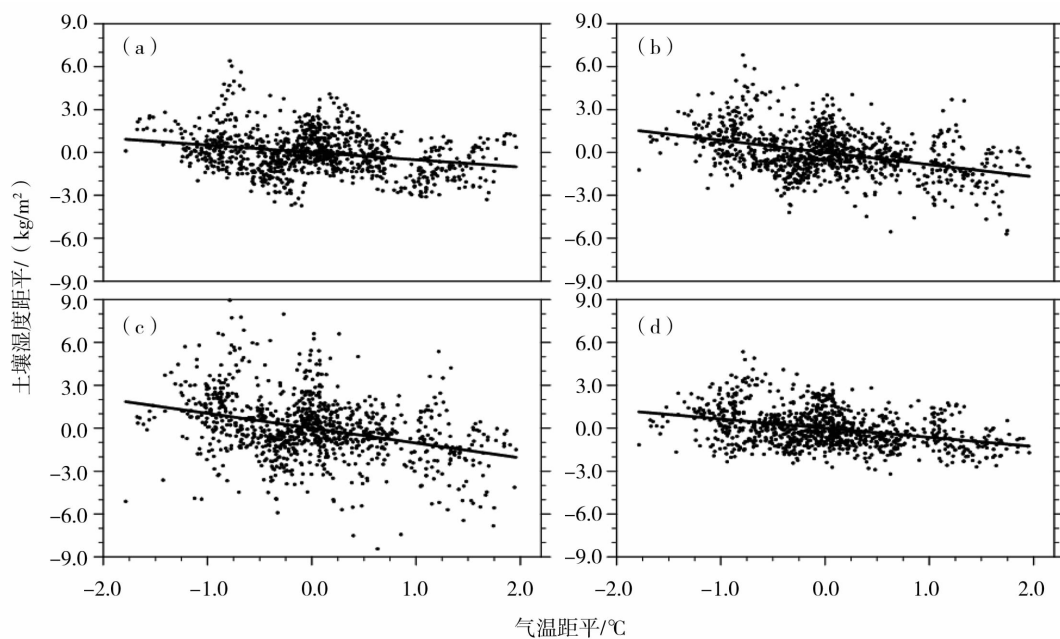


图 6 1948~2010 年黄土高原半干旱区年平均气温距平与土壤湿度距平的关系

(a) 0~10 cm, (b) 10~40 cm, (c) 40~100 cm, (d) 100~200 cm

Fig. 6 The relationship between annual mean air temperature anomaly and soil moisture anomaly over the semi-arid area in Loess Plateau from 1948 to 2010 in different layers

通过 1948 ~ 2010 年黄土高原半干旱区年平均降水距平与土壤湿度距平的关系分析(图 5)发现,不同层的土壤湿度和降水均存在显著的正相关关系,相关系数随深度增加而逐渐减小,从表层(0 ~ 10 cm)的 0.86 下降到深层(100 ~ 200 cm)的 0.34,可见表层土壤湿度对降水信号的响应比深层强烈,主要因为黄土高原半干旱区土壤表层(0 ~ 10 cm)水分直接来源于自然降水,其它层土壤水分是降水通过该层逐步渗透而获得,而该地区降水量较小(200 ~ 600 mm),除去植株截流和表面蒸发,实际进入土壤深层从而引起土壤湿度变化的有效降水较少,导致深层土壤湿度与降水的相关性较弱。分析气温距平与土壤湿度距平的关系发现,黄土高原半干旱地区的气温与不同层土壤湿度之间均存在显著负相关关系,4 层相关系数分别为 -0.26, -0.39, -0.34, -0.36,都通过了 99% 的显著性检验,气温和土壤湿度的关系大体随着土壤层的加深变得显著(除第二层外)。

通过以上的分析,表明在黄土高原半干旱区,气温和降水对土壤湿度的影响方式和作用层存在显著性差异。土壤湿度在表层表现出与降水强烈的相关关系,而气温则更多的对深层土壤湿度产生影响。

由于黄土高原半干旱地区降水、气温和土壤湿度存在明显的季节变化,为了进一步分析在不同季

节降水、气温对土壤湿度影响的差异,我们计算了 1948 ~ 2010 年不同季节 4 层(0 ~ 10 cm、10 ~ 40 cm、40 ~ 100 cm 和 100 ~ 200 cm 层)土壤湿度与降水量、气温的相关系数(图 7)。可以看出各层土壤湿度和降水均呈正相关关系,相关系数随深度增加而减小;与气温均为负相关关系,除秋季外,其他季节的气温和土壤湿度的相关系数最大值都出现在第二层(10 ~ 40 cm)。比较不同季节的降水和气温与土壤湿度的关系发现,冬季降水和气温对表层土壤湿度的影响都不显著;春季的相关与冬季具有类似规律,但相关性明显高于冬季;秋季降水、气温和土壤湿度的相关与春季和冬季有很大不同,秋季土壤湿度与降水的相关显著,与气温的关系却不明显,是相关最不显著的季节;夏季降水和气温与土壤湿度的相关性都较好,这与黄土高原半干旱区夏季高温多雨的气候特点分不开,但是在土壤深层(40 ~ 100 cm 和 100 ~ 200 cm),特别是 100 ~ 200 cm 层,秋季降水与土壤湿度的相关性远大于夏季。这是因为,夏季是黄土高原半干旱区温度最高,降水最集中的季节,高温多雨的气候特点导致该地区夏季的地表蒸散和地表径流较大,受此影响,只有有限的降水能够达到土壤深层;同时秋季也是黄土高原的主要降水期,但是气温较夏季要低得多,高降水低气温的秋季气候特点导致降水与深层土壤湿度的相关性远大于夏季。

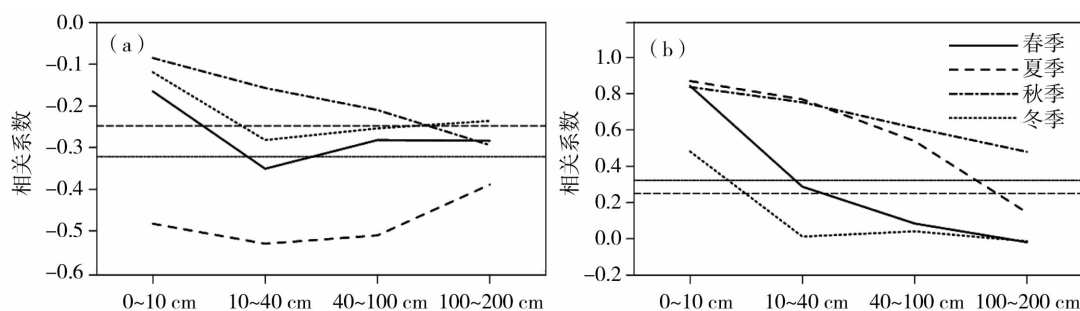


图 7 气温(a)和降水(b)与土壤湿度的相关系数

(平行于横轴的短划线和虚线分别为相关系数超过 95% 和 99% 显著性检验的临界值)

Fig. 7 Correlation coefficients between air temperature(a), precipitation(b) and soil moisture

(Dashed and dotted lines parallelling to the horizontal axis

represent the thresholds under 95% and 99% confidence level)

2.3 降水和气温对土壤湿度的定量影响

通过以上研究发现,气温和降水在土壤湿度变化过程中都发挥了重要的作用,为了定量分析两者对土壤湿度的影响大小,我们利用多元回归分析建立了不同季节 4 层标准化土壤湿度与气温、降水量的关系(表 2),并利用 Huang 等^[34]的方

法分别计算了气温和降水对土壤湿度的相对贡献大小(表 3)。表 2 表明,各层土壤湿度与降水大致呈正相关关系,与气温呈负相关关系。在不同季节,降水和气温对不同层土壤湿度的影响程度不同,其中,秋季降水与 4 层土壤湿度均为显著正相关关系(回归系数都通过了 99% 显著性检验),随

土壤深度的增加,回归系数逐渐减小,但仍然维持了较高的显著性水平;气温与4层土壤湿度均为负相关关系,回归系数随土壤深度增加而逐渐增大,但相关不显著,只有第四层通过了95%的显著性检验。夏季降水、气温与土壤湿度的关系和秋季具有类似规律,只是夏季气温的回归系数比秋

季更显著,而降水的回归系数不如秋季显著。春季和冬季的相关与夏季、秋季有很大差异,降水与0~10 cm层土壤湿度显著正相关,从土壤第二层起,回归系数迅速减小;气温和土壤湿度的回归系数最大值都出现在第二层(10~40 cm)。回归分析得出了与2.2中相关分析一致的结论。

表2 各季气温和降水量与不同深度土壤湿度的二元关系

Tab. 2 Binary relations between seasonal air temperature, precipitation and soil moisture in different layers

回归系数		0 ~ 10 cm	10 ~ 40 cm	40 ~ 100 cm	100 ~ 200 cm
春季	气温	-0.054	-0.318 **	-0.276 *	-0.291 *
	降水	0.835 **	0.245 *	0.047	-0.058
夏季	气温	-0.159 *	-0.266 **	-0.352 **	-0.395 **
	降水	0.805 **	0.661 **	0.397 **	-0.014
秋季	气温	-0.048	-0.123	-0.183	-0.274 *
	降水	0.833 **	0.747 **	0.603 **	0.466 **
冬季	气温	-0.110	-0.282 *	-0.253 *	-0.236
	降水	0.479 **	0.007	0.036	-0.018

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著; ** 在 0.01 水平(双侧)上显著。

表3 各季气温和降水量对不同深度土壤湿度的贡献率(单位:%)

Tab. 3 Relative contributions of seasonal air temperature and precipitation to soil moisture in different layers(Unit: %)

		0 ~ 10 cm	10 ~ 40 cm	40 ~ 100 cm	100 ~ 200 cm	平均值
春季	气温	4.03	54.10	84.50	82.36	56.25
	降水	95.97	45.90	15.50	17.64	43.75
夏季	气温	20.19	33.23	50.66	97.96	50.51
	降水	79.81	66.77	49.34	2.04	49.49
秋季	气温	2.72	11.35	21.26	36.95	18.07
	降水	97.28	88.65	78.74	63.05	81.93
冬季	气温	14.37	94.88	82.17	89.00	70.11
	降水	85.63	5.12	17.83	11.00	29.89

在不同季节和不同深度,气温和降水对土壤湿度的作用并不完全一致。通过计算气温和降水对土壤湿度的相对贡献率发现,春季和冬季的气温相对贡献率大于降水,在春季和冬季气温对4层土壤湿度的平均贡献率分别为56.25%和70.11%,特别是在冬季降水的相对贡献率不到30%;秋季的贡献率情况与以上2个季节相反,降水的相对贡献率远大于气温;夏季的气温和降水贡献率大小相当,各占50%左右。此外,从土壤层次来看,浅层降水贡献率远远大于气温,而深层正好相反。其中,春季0~10

cm层降水对土壤湿度的相对贡献率占95.97%,气温只占4%左右,而在100~200 cm层气温的相对贡献率在80%以上。这与我们上述的定性分析结果一致。

3 结 论

通过以上对黄土高原半干旱区气温、降水和土壤湿度的变化特征分析,发现了该地区气温和降水对土壤湿度变化的作用差异,并对两者的相对贡献给出了定量关系,得出以下几点结论:

(1)近 60 a 来黄土高原半干旱区整体呈现暖干化趋势。气温倾向率为 $0.227\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 高于近百年全球平均 $0.104\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的增温速率, 且冬季增温显著。降水和气温具有不同的变化特征, 年际波动较大, 气候变化趋势不明显。

(2)不同层土壤湿度的季节变化特征具有一定差异。表层土壤湿度有明显的季节性变化, 与降水的季节性变化基本一致, 为单峰型。深层土壤湿度的季节变化不明显, 受降水等当地气候要素的季节性变化影响相对较弱, 变化趋势与表层也有所差异, 和降水量的极大值有 1 ~ 3 个月左右的滞后性。

(3)黄土高原半干旱地区 4 层土壤湿度的长期变化存在较好的一致性, 均呈减小趋势, 且年际间变化明显。

(4)土壤湿度和气候要素的相关分析指出, 土壤湿度和降水呈正相关关系, 且相关性随深度增加而逐渐减小; 与气温呈负相关关系, 深层相关性大于表层。

(5)气温和降水在不同季节对不同层土壤湿度的相对贡献有显著性差异, 其中, 春季和冬季气温对土壤湿度的相对贡献较降水显著, 秋季恰好相反, 夏季气温和降水对土壤湿度的相对贡献大小相当, 并且所有季节的结果都反映出, 降水对浅层土壤湿度有显著作用, 气温对深层土壤湿度的作用更明显。
致谢: 美国航空航天局 (NASA) 戈达德空间飞行中心 (GSFC) 和美国海洋和大气局 (NOAA) 国家环境预报中心 (NCEP) 提供宝贵的 GLDAS 数据。

参考文献:

- [1] 张强, 张存杰, 白虎志, 等. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响—总体暖干化, 局部出现暖湿迹象[J]. 干旱气象, 2010, 28(1): 1-7.
- [2] Huang J P, Guan X D, Ji F. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012(12): 5391-5398.
- [3] 马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征[J]. 大气科学, 2005, 29(5): 671-681.
- [4] 姚玉璧, 王毅荣, 李耀辉, 等. 中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 146-152.
- [5] 姚玉璧, 李耀辉, 王毅荣, 等. 黄土高原气候与气候生产力对全球气候变化的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 202-208.
- [6] 陈少勇, 郭凯忠, 董安祥. 黄土高原土壤湿度变化规律研究[J]. 高原气象, 2008, 27(3): 530-537.
- [7] 史晓霞. 黄土高原半干旱区主要作物生育期土壤水分变化[J]. 干旱气象, 2011, 29(4): 461-465.
- [8] 严丽, 王飞, 蒋冲, 等. 陇东黄土高原农田土壤湿度演变对气候变化的响应[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 11-16.
- [9] 郭维栋, 马柱国, 姚永红. 近 50 年中国北方土壤湿度的区域演变特征[J]. 地理学报, 2003, 58(增刊): 83-90.
- [10] 郭锐, 朱燕君, 王介民, 等. 近 22 年来西北不同类型植被 NDVI 变化与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 319-327.
- [11] 信忠保, 许炯心. 黄土高原地区植被覆盖时空演变对气候的响应[J]. 自然科学进展, 2007, 17(6): 770-778.
- [12] 张强, 肖风劲, 牛海山, 等. 我国北方植被指数对土壤湿度的敏感性分析[J]. 生态学报, 2005, 24(7): 715-718.
- [13] 宁惠芳, 林婧婧, 陈佩璇. 甘肃省气候暖干化与农业干旱灾害的联系[J]. 干旱气象, 2010, 28(2): 198-201.
- [14] 赵鸿, 李凤民, 熊友才, 等. 土壤干旱对作物生长过程和产量影响的研究进展[J]. 干旱气象, 2008, 26(3): 67-71.
- [15] 吴哲红, 詹沛刚, 陈贞宏, 等. 3 种干旱指数对贵州省安顺市历史罕见干旱的评估分析[J]. 干旱气象, 2012, 30(3): 315-322.
- [16] 王劲松, 任余龙, 宋秀玲. K 干旱指数在甘肃省干旱监测业务中的应用[J]. 干旱气象, 2008, 26(4): 75-79.
- [17] 管晓丹, 郭锐, 黄建平, 等. 植被状态指数监测西北干旱的适用性分析[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1046-1053.
- [18] 郭锐, 管晓丹. 植被状况指数的改进及在西北干旱监测中的应用[J]. 地球科学进展, 2007, 22(11): 1160-1168.
- [19] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 等. 土壤湿度指数在黄土高原的适宜性评价[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(3): 31-36.
- [20] 张强, 王胜, 卫国安. 西北地区戈壁局地地面物理参数的研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 616-623.
- [21] Guan X D, Huang J P, Guo N, et al. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal parameters over the Loess Plateau[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(4): 692-700.
- [22] 朱乾根, 兰红平, 沈桐立. 土壤湿度和地表反射率变化对中国北方气候影响的数值研究[J]. 气象学报, 1996, 54(4): 493-500.
- [23] 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系[J]. 气象学报, 2000, 58(3): 278-287.
- [24] 李百超, 温秀卿, 王瞭瞭, 等. 黑龙江省春季土壤湿度近 30 a 变化趋势[J]. 干旱气象, 2011, 29(3): 289-296.
- [25] 王磊, 文军, 韦志刚, 等. 中国西北区西部土壤湿度及其气候响应[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1257-1266.
- [26] 陈少勇, 郭玉珍, 郑延祥, 等. 甘肃旱作农业区降水对土壤水分的影响[J]. 中国沙漠, 2012, 32(1): 155-162.
- [27] 郭锐, 陈添宇, 雷建勤, 等. 用 NOAA 卫星可见光和红外资料估算甘肃省东部农田区土壤湿度[J]. 应用气象学报, 1997, 8(2): 212-218.
- [28] 刘树华, 蔺洪涛, 胡非, 等. 土壤—植被—大气系统水分散失机理的数值模拟[J]. 干旱气象, 2004, 22(3): 1-10.
- [29] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The global land data assimilation system[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(3): 381-394.
- [30] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System[J]. Science, 2004, 305: 503-505.
- [31] Reichle R H, Koster R D, Liu P, et al. Comparison and assimila-

- tion of global soil moisture retrievals from the Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E) and the Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112 (9). DOI:10.1029/2006JD008033.
- [32] Niu G Y, Yang Z L, Dickinson R E, et al. Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with Gravity Recovery and Climate Experiment data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112 (7). DOI: 10.1029/2006JD007522.
- [33] Quintana Seguí P, Moigne P L, Durand Y, et al. Analysis of near-surface atmospheric variables: validation of the SAFRAN analysis over France[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(1):92-107.
- [34] Huang J P, Yi Y H. Inversion of a nonlinear dynamical model from the observation[J]. *Science in China(Series B)*, 1991, 34(10):1246-1251.

Analysis of Response of Soil Moisture to Climate Change in Semi-arid Loess Plateau in China Based on GLDAS Data

CHENG Shanjun, GUAN Xiaodan, HUANG Jianping, JI Mingxia

(Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education,
College of Atmospheric and Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The variations of air temperature, precipitation and soil moisture are analyzed over semi-arid region of Loess Plateau from 1948 to 2010 by using GLDAS data, and the relative contributions of air temperature and precipitation to soil moisture are highlighted. The results show that there was a warming and drying trend in the recent 60 years in the semi-arid region of Loess Plateau, and the warming rate was higher than the global average warming trend. The long-term variations of soil moisture in different layers showed a decreasing trend with a clear interannual change. There was a negative correlation between soil moisture and air temperature in all layers, and with the increase of soil depth the correlation enhanced. On the contrary, a positive correlation could be observed between precipitation and soil moisture and the largest correlation coefficient appeared at the surface layer. By analysing the relative contributions of air temperature and precipitation to soil moisture in different layers and different seasons, it could be found that air temperature had a significant contribution to soil moisture in spring and winter, while precipitation had an obvious contribution to soil moisture in fall. In summer, precipitation and air temperature had an equivalent contribution to soil moisture. Additionally, in four seasons it showed that precipitation significantly affected soil moisture in shallow layers, while air temperature affected it in deep layers.

Key words: semi-arid area; Loess Plateau; soil moisture; air temperature; precipitation